Постановка задачи. В работе [1] изучена возможность использования фильтрации с помощью аналитического продолжения в верхнее полупространство в качестве способа разделения возмущающих источников на различных глубинах. В этом исследовании сделан ряд допущений об упрощённом рассмотрении геологической среды, но главное, что следует держать в виду, что грави- и магнитные данные не содержат явно информации о глубине источников аномалий. Вследствие решения соответствующей прямой задачи всегда можно создать любую модель наблюдённого поля по распределению значений намагничения (или плотности) на поверхности измерений. Но такое формальное математическое решения лишь в исключительных случаях будет иметь геологически значимое содержание.

Исходя из этого в работе [1] сделано предположение о том, что наблюдённое магнитное поле представлено в виде аддитивной модели: сумма полей регионального фона, остаточных аномалий и агрегированного шума. При этом, в качестве модели среды использовано семейство взаимно некоррелируемых распределений тонкослоистых источников с целью решения прямой задачи – вычисления модели поля (получить эквивалентный набор шаблонов полезного сигнала).

Такой приём означает, что поля, вычисленные для разных значений глубин источников, имеют нулевую корреляцию. Это условие отнюдь не выглядит таким ограничивающим, как может показаться на первый взгляд, поскольку множество распределений неоднородности во вмещающей среде, вообще говоря, могут иметь как положительную, так и отрицательную корреляцию. Вследствие этого допущение о нулевой корреляции рассматривается всего лишь как частный случай нейтрального распределения. В физическом смысле, подобные распределения представляют собой слои с эквивалентными источниками, и к их обработке можно привлечь соответствующие методы фильтрации по эквивалентным источникам.

Метод исследований. Обобщая вышеупомянутую работу [1], можно предложить следующий алгоритм восстановления потенциального поля по эквивалентному распределению источников:

- Для извлечения (отделения) поля регионального фона от источников, находящихся на глубине h_0, нужно аналитически продолжить наблюдённое поле на высоту $2h_0$ по известным соотношениям. В волновой области оптимальный фильтр для такой операции следующий: $F_r(x) = e^{(-2x\cdot h0)}$). Можно затем извлечь это региональное поле из полного магнитного поля, чтобы получить разностное поле остаточных аномалий. В настоящее время имеется достаточно программных средств, чтобы осуществить подобную операцию с надлежаще подготовленными данными.
- Для вычисления распределения намагничения в заданной области от слоя эквивалентных источников, расположенного между глубинами h_1 и h_2, нужно вычислить разницу операторов аналитического продолжения вверх на высотах $2h_2$ и $2h_1$, т.е., найти разность от пересчёта вверх сдвоенных значений соответствующих глубин. В волновой области оптимальный фильтр для такой операции: $F_{sl}(x) = e^{(-2x\cdot h1)}) – e^{(-2x\cdot h2)}$).

Аномалии, имеющие источник внутри слоя эквивалентных источников, обычно выделяются более рельефно после фильтрации. Впрочем, в слабоградиентном мозаичном поле, осложнённом резкими структурными несогласиями, такая определённость теряется. Мы рекомендуем использовать альтернативные методы фильтрации (например, гармонический анализ [2], либо фильтры Винера [3]).

В сообщении рассмотрен изложенный выше способ качественной фильтрации магнитных аномалий в приложении к обработке набора данных полного магнитного поля, полученных при детальном исследовании археологического объекта в Pineview парке (исходные данные получены из репозитория www.ngdc.noaa.gov). Здесь реализован поэтапный пересчёт аномалий полного магнитного поля вверх на высоту 0.5, 1.5, 2 и 4 м, соответственно (рис. 1) на равнинном участке территории парка 30×80 м (горизонтальный масштаб дан в м, магнитная индукция – в нТ, контуры изолиний проведены через 25 нТ). Пересчёт осуществляется с целью подавить коротковолновой шум и выделить локальные аномалии.

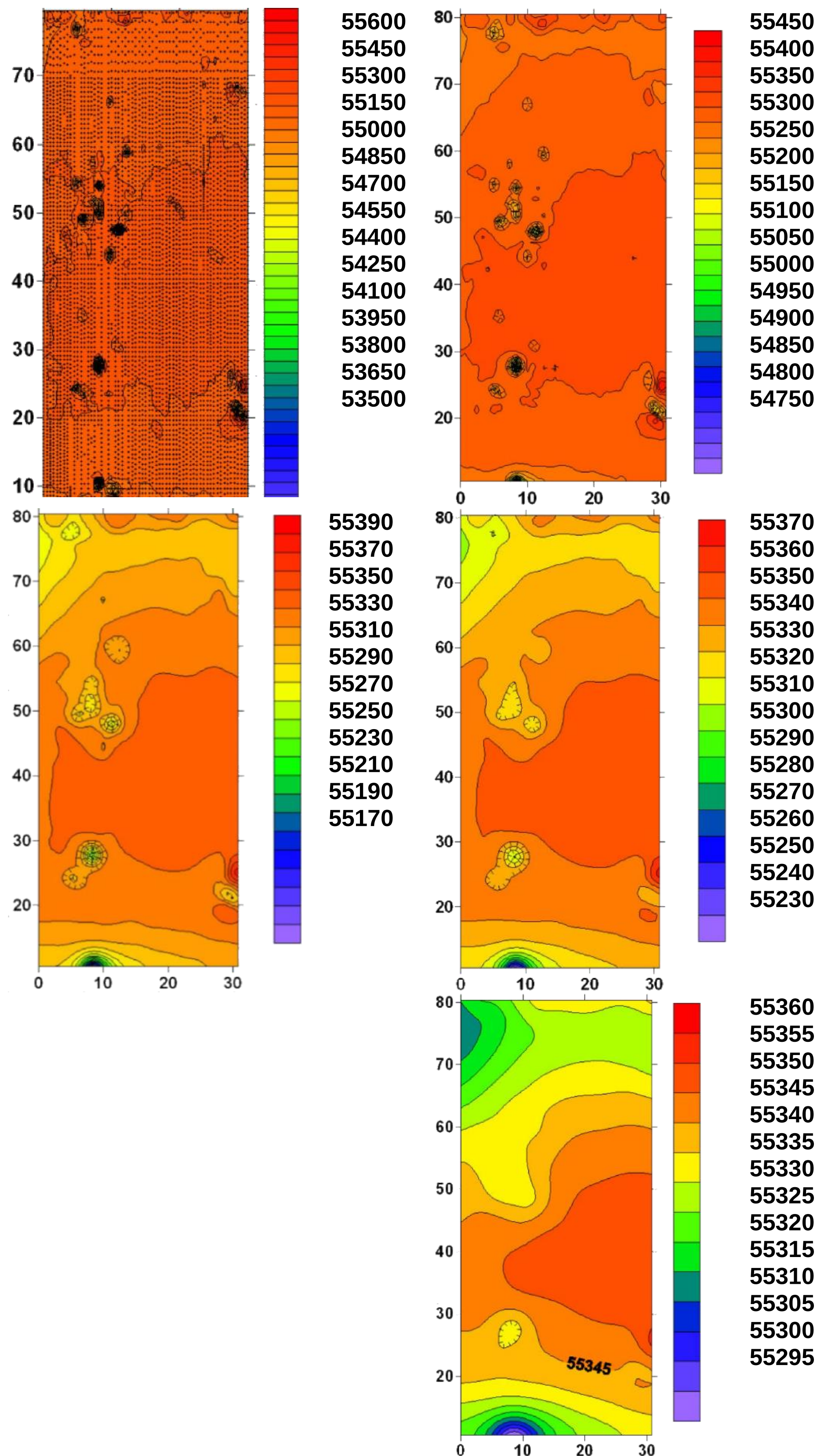


Рис. 1. *Исходные данные (аномалия полного магнитного поля ΔT в нТ, верхний левый рисунок) и результаты его продолжения вверх (слева направо), на 0.5 м; на 1.5 м; на 2 м; на 4 м.*

Черные точки на рис. 1.1 обозначают расположение пунктов измерений с магнитометром. При этом на рис. 2-5 нижний край участка обрезан из-за высоко-градиентного шума (близость к металлической ограде, исключено из анализа), а также, исключены (пропущенные точки) неко-

торые наблюдения про профилях из-за низкого качества. Повторить наблюдения не представляется возможным из-за изменения технологических условий (раскопы, обводнение и т.п.). Даже в период измерений многие аномалии из интересующего нас метрового диапазона, попали в проблемные по условиям измерений зоны.

Магнитные аномалии, рассчитанные от слоя эквивалентных источников (рис. 2) в программе SignProc 1.56 (G.R.J. Cooper, 2000) путём дифференцирования продлённого на соответствующий уровень магнитного поля (рис. 1.2-5) между уровнями 0.5÷1.5 м, 1÷2 м, и 2÷4 м, соответственно. Эти слои заданных источников априори содержат коррелируемые решения. Краткий качественный анализ полученного поля позволяет предположить, что наибольший интерес с точки зрения планируемых раскопок представляют аномалии, с центрами в координатах (по сети участка) *x*=8, *y*=50; *x*=8, *y*=28; *x*=30, *y*=22. Эти 3 аномалии либо содержат заметное количество магнитного материала возле поверхности (2÷4 м), либо вызваны возмущающими телами, расположенными на значительной глубине (17-20 м под поверхностью).

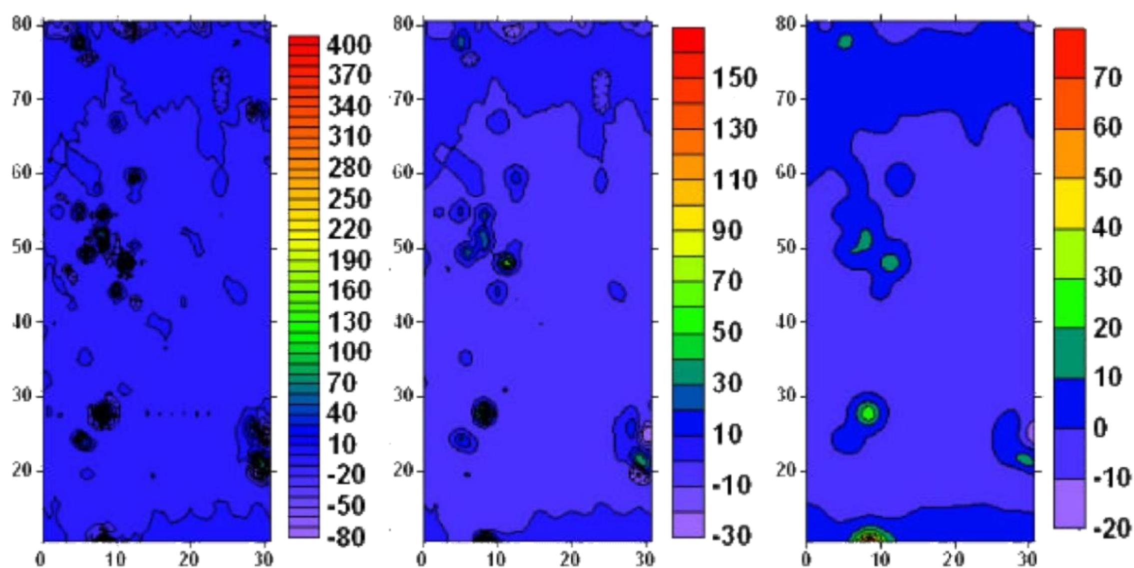


Рис. 2. *Магнитные аномалии, рассчитанные от слоя эквивалентных источников в слоях (0.5-1.5 м), (1-2 м), (2-4 м).*

Анализ результатов. Качественный анализ исходного поля (рис. 1.1) и его трансформаций (рис. 1.2-5) подтвердил, что, в общем случае, продолжение вверх на величину, равную шагу по профилю (0.5 м), не даёт значительную ‘прибавку’ в разрешении, но иногда значительно снижает высокочастотный (коротковолновой) шум.

Наложение сети точек наблюдений (рис. 1.1) на те же точки значений магнитного поля (рис. 2.3), полеченные при расчёте прямого эффекта от слоя эквивалентных источников на интервале глубин 1÷2 м (рис. 3.1) показало, что следует с крайней осторожностью трактовать 2 большие аномалии на западном краю участка карты. Хотя большинство точек наблюдений и подтверждают эти аномалии, их качественный анализ показывает большую вероятность глубинного происхождения аномальных источников. К тому же, они сильно коррелируются с профилями наблюдений, на которых исключено много (15%) наблюдений с повышенным шумом.

Последующее наложение значений магнитного поля, рассчитанных на том же интервале глубин 1÷2 м расположения слоя эквивалентных источников, но с большей детальностью (рис. 3.2, контур через 2 нТ) подтверждает предыдущий вывод. Здесь точки указывают максимальные значения горизонтального градиента поля. По их расположению можно качественно оценить положение границ возмущающих тел ниже поверхности наблюдений. В данном случае, особенности поля возле северного края карты, менее выражены со сжатым контуром и подчёркнуты значительной величиной горизонтального градиента магнитного поля. Это означает меньшую вероятность содержательного истолкования (сомнительные источники).

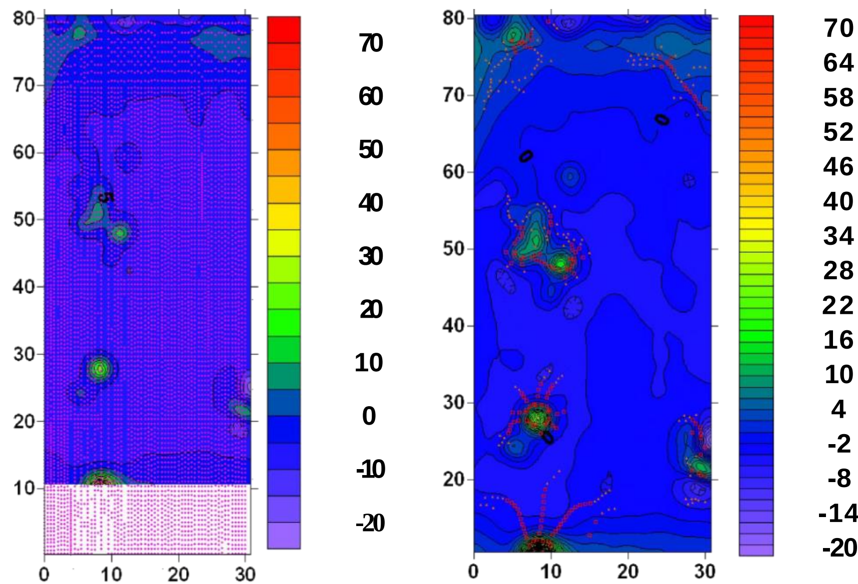


***Рис. 3**. 1. Наложение сети наблюдений исходного магнитного поля на результат его трансформации в поле эквивалентных источников; 2. поле эквивалентных источников с повышенной детальностью.*

Альтернативные исследования. В работе [4] исследована возможность восстановления модели магнитных свойств ниже поверхности наблюдений на основе решения обратной задачи магнитометрии с помощью адаптивного метода Кочнева (в программе ADGM-3D). Там успешно восстановлена послойная магнитная восприимчивость для модели из 3 слоёв. Эту методику можно рекомендовать для параллельного подсчёта и контроля вычислений.

Детальное исследование [5] обосновывает методику восстановления магнитных свойств приповерхностных объектов геологической среды по данным магнитометрии (модуль магнитной индукции B геомагнитного поля). В этой работе исследованы различные методы разделения аномалий (усреднение; вычисление вариаций; исключение регионального фона; аналитическое продолжение вверх и вычисление остаточных аномалий; фильтрация регионального фона). Количественная характеристика этих методов локализации магнитных аномалий позволяет установить, что наиболее предпочтительным является корреляционный метод выделения локальных аномалий, основанный на тренд-анализе исходных данных. Он наименее подвержен погрешностям, и рекомендован в [5] как лучшее средство разделения локальных и региональных аномалий при обработке материалов магнитометрических съёмок археологических объектов.

Для оценки достоверности выявленных аномалий использован приём, описанный в [5]: формула (21) метода обратной вероятности рассчитывает коэффициенты максимального правдоподобия по сравнению с эталонными аномалиями (рассчитанными от теоретических моделей). Надёжно выявленными считают аномалии с вероятностью более 50%. В нашем случае вероятность выделения “полезной” аномалии составляет 75-100%, а аномалии-помехи не более 20%.

Выводы. На основе анализа магнитных данных для парка Pineview 30×80 м осуществлён комплекс преобразований магнитных аномалий с целью их археологического истолкования. Разделение аномалий проведено с помощью аналитического продолжения вверх, а расчёт источников в эквивалентном слое – с помощью вычисления разностного поля от верхней и нижней аномальных границ источников. Дополнительную информацию для качественного анализа дал расчёт горизонтального градиента магнитной индукции с целью более точной классификации локальных аномалий по амплитуде. Эти преобразования можно дополнять расчётами других характеристик, информативных в конкретных условиях применения. Результаты интерпретации имеют качественный характер, но позволили локализовать места раскопов, рассчитать параметры объектов (намагниченности, глубины залегания, контуры, степень сохранности) с помощью решения соответствующих обратных задач.

Литература

1. *Jacobsen J.F.* A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps // Geophysics. – 1987. – **52**, № 8. **-** Pp. 1138–1148.
2. *Giuli Verbanac*. On regional modeling of the main geomagnetic field // Geofizika. – 2007. – **24**, № 1. – P. 1-27.
3. *Тихоцкий С.А*. Оптимальная по Колмогорову-Винеру интерполяция и фильтрация аномальных полей, измеренных на произвольном множестве точек: теоретические аспекты // Корреляционно-статистические методы обработки и интерпретации геофизических данных: Уч. пос. – Пермь, 1998.
4. *Кочнев В.А., Зданович Г.Б., Пунегов Б.Н*. Опыт применения 3D-технологий интерпретации магнитных полей на археологическом обьекте "Аркаим" / XI Уральская мол. науч. школа по геофизике, 15-19 марта 2010 г., Еатеринбург. – Сб. докл. – Екатеринбург, 2010.
5. *Дудкин В.П., Кошелев И.Н.* Комплексная интерпретация магнитометрической съёмки архео-логических памятников // Вост.-европ. Археол. журн. – 2004. – 3(16).